

**А.В. КРЫЖАНОВСКИЙ**, асп., ОНМА, Одесса

## СПЕЦИФИКА ПЕРЕВОЗКИ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ НАВАЛОМ

В данной статье рассматриваются проблемы перевозки никелевой руды навалом и связанные с этим опасности вследствие разжижения данного груза при перевозке морским транспортом. Показано, что поведение никелевой руды под воздействием гармонических колебаний в определённом диапазоне частот и амплитуд оказывает отрицательное воздействие на остойчивость судна, подвергающее значительной опасности как экипаж судна, так и окружающую среду.

**Ключевые слова:** математическая модель, разжижаемость, смещаемость, плотность, удельный погрузочный объем, удельная масса, виброреология, сегрегация, самосортирование, гармонические колебания.

Мировой торговый флот состоит из балкеров, которые используются для перевозки неупакованных сыпучих грузов, танкеров, предназначенных для транспортировки наливных грузов, и контейнерных судов.

Для обеспечения безопасной перевозки надо знать физико-химические и транспортные свойства навалочных грузов и их влияние на судно, и экипаж в процессе морской перевозки. Физический состав любого навалочного груза можно рассматривать как состав фракций твердых частиц, воды и воздуха.

В зависимости от их соотношения можно определить основные физико-механические свойства навалочного груза: плотность и удельный погрузочный объем. В зависимости от плотности грузы делятся на тяжелые – менее  $0,56 \text{ м}^3/\text{т}$ ; средние – от  $0,56$  до  $1,0 \text{ м}^3/\text{т}$  и легкие – более  $1,0 \text{ м}^3/\text{т}$ .

На рис. 1 изображены типы гранул различных грузов в зависимости от наличия влаги и соответственно способности к абсорбции.

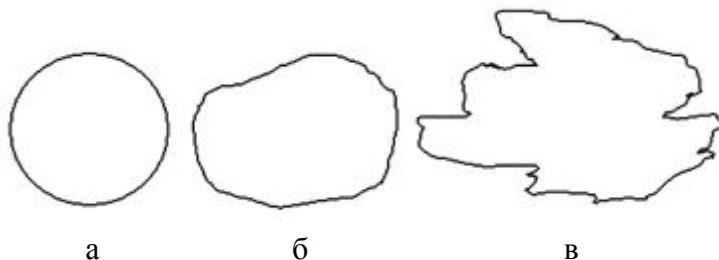


Рис. 1 – Типы гранул различных материалов

На рисунке 1 изображено: а – тип гранул, которые наименее способны абсорбировать влагу; б – тип гранул, обладающих более высокой способнос-

© А.В. Крыжановский, 2014

стью к абсорбции влаги; в – тип гранул, которые обладают повышенной способностью к абсорбции влаги.

Определим основные свойства сыпучих грузов:

- Размеры гранул;
- Распределение гранул по размерам;
- Формы гранул;
- Площадь поверхности гранул;
- Гладкость площади поверхности гранул;
- Степень фиксации или составления мозаики между гранулами;
- Вес или плотность материала за единицу.

К типу гранул на рисунке 1 относится такой вид груза как никелевая руда, различные концентраты и т. д. Очевидно, что тип в – обладает наибольшей шероховатостью поверхности, большими размерами, а, следовательно, и обладает повышенной способностью к абсорбции влаги [2] .

**Математическая модель.** Данный процесс можно описать с помощью виброреологического (вибромеханического) подхода аналогично [1].

Примером использования вибромеханического подхода к рассмотрению сложной механической системы может служить следующая модель поведения сыпучей среды в вибрирующих лотках и сосудах (рис. 2).

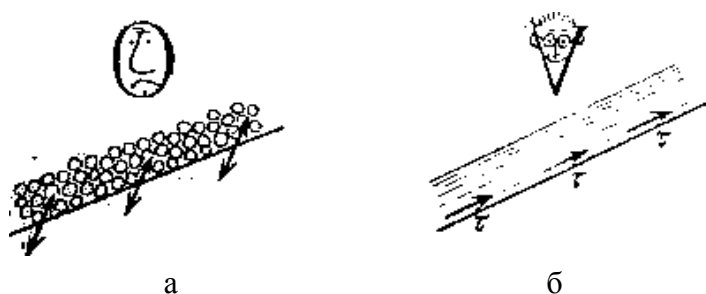


Рис. 2 – Движение слоя сыпучей среды по вибрирующему лотку: а – реальная картина; б – модель медленных движений

Медленные движения сыпучей среды рассматриваются как движения жидкости (не обязательно ньютоновской), реологические характеристики которой зависят от параметров вибрации. Что же касается граничных условий, то вместо обычного условия прилипания  $v(s) = 0$  на участках соприкосновения среды со стенками трюма задается выражение для касательного напряжения  $\tau(s) = \tau(v_\tau)$ . Здесь  $\tau(v_\tau)$  известная функция касательной проекции скорости среды  $v_\tau$  представляющая собой удельную вибрационную силу (напряжение). Последняя может быть найдена либо аналитически – путем реше-

ния задачи о виброперемещении либо экспериментально [1].

На основе предложенной математической модели может быть описан процесс вибробункеризации, а также процесс вибротранспортирования сыпучего материала по неоднородно колеблющейся поверхности. При использовании такого типа модели необходимо иметь в виду определенные условия ее применимости. В частности, при относительно толстых слоях необходимо учитывать также и объемные вибрационные силы. В результате может быть, например, объяснено возникновение медленных потоков [2].

Рассмотрим взаимосвязь между виброреологическими процессами, воздействующими на перевозимый груз в течение рейса и его физическими свойствами накапливать большое количество влаги, а затем отдавать ее тем самым увеличивая риск транспортировки сырья, в силу возникновения такой опасности как «смещаемость», либо как принято еще называть «ползучесть». Неотъемлемой частью данного процесса является разделение частиц (сегрегация). Некоторые закономерности разделения в слое, называемого также сегрегацией и самосортированием, схематически представлены на рис. 3.

На рис. 3 изображены различные случаи сегрегации и самосортирования смесей:

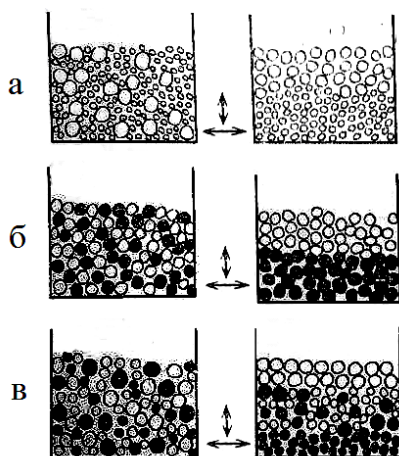


Рис. 3 – Сегрегация, самосортирование смеси, под действием горизонтальной симметричной или вертикальной вибрации.

- а – в случае смеси крупных и мелких частиц одинаковой плотности в результате вибрирования крупные частицы располагаются над мелкими;

- б – в случае смеси тяжелых и легких частиц одинаковой крупности легкие частицы располагаются над тяжелыми;

- в – в случае смеси крупных и мелких частиц двух различных плотностей нижнее положение займут мелкие тяжелые, затем расположатся мелкие легкие, крупные тяжелые (или смесь мелких легких и крупных тяжелых); в верхнем положении окажутся крупные легкие частицы.

При отсутствии вибрационного поля, находящаяся в сосуде смесь разнородных, частиц сыпучей среды в поле силы тяжести или другом стационарном силовом поле может иметь вследствие действия сил типа сухого трения бесконечное число непрерывно распределенных положений равновесия: она располагается так или почти так, как ее засыпали в сосуд. При нало-

жении вибрационного поля на смесь крупных и мелких частиц одной плотности крупные частицы расположатся над мелкими частицами (рис. 3 а). В случае смеси частиц одинакового размера, но с различными плотностями легкие частицы расположатся над тяжелыми (рис. 3 б). При смеси крупных и мелких частиц различных плотностей нижнее положение займут мелкие тяжелые, затем расположатся мелкие легкие крупные тяжелые (или смесь мелких легких и крупных тяжелых); в верхнем положении окажутся крупные легкие частицы (рис. 3 в).

Таким образом, под действием вибрационного поля сыпучая смесь стремится к определенному квазиравновесному состоянию под действием сил сухого трения. Вместе с тем на равновесное состояние могут существенно повлиять возникающие при вибрации движущие вибрационные силы. В результате равновесное положение смеси в потенциальном силовом поле может не соответствовать минимуму потенциальной энергии, как это было бы при наличии только сил вязкого трения, отчасти данное важное обстоятельство можно рассмотреть на рис. 3 в [2].

Были проведены экспериментальные исследования направленные на изучение поведения гранулированных материалов в зависимости от содержания влаги и влияния гармонических колебаний в определённом диапазоне частот и амплитуд.

Два материала, различные по своим физико-механическим свойствам (песок и жмых) исследовались на на распространение влажности в теле материала и в их удельной массе. Для проведения исследования был использован вибрационный стол иммитирующий крен судна (рис. 4).



Рис. 4 – Вибрационный стол школы военно-морской архитектуры и морских работ

Для исследования выбраны два образца материалов, такие как песок – удельная масса примерно  $1,386 \text{ т/м}^3$ , со средним диаметром гранул, исходя из анализа произведенного оптическим микроскопом,  $0,5 \text{ мм}$  и жмыха масла содержащих продуктов, т.е. побочным продуктом обработки семян маслиничных растений, удельная масса которого составила  $0,52 \text{ т/м}^3$  и средний диаметр частиц  $4,5 \text{ мм}$ .

Во всех тестах емкости были заполнены материалом по отметку  $11,5 \text{ см}$ .

Для каждого типа материалов были выполнены по два следующих теста: первый для качки и второй для гармонических колебаний.

Хотелось бы отметить, что центр вращения (качки) был в центре вибрационного стола, т. е. в основании емкости (контейнера).

Продолжительность каждого эксперимента составила  $30 \text{ с}$ .

Два теста на смещение при качке выполнены для жмыха, с уровнем влаги приблизительно  $60 \%$ .

Первый тест был выполнен на начальном этапе (еще без появления признаков разжижения), в то время как второй был выполнен после интенсивного гармонического воздействия и появления разжижения.

- Для песка:

Начальное влагосодержание песка составило  $0 \%$ , что было достигнуто, при помощи нагрева в печи. Уровень влажности позже был поэтапно увеличен, до  $40 \%$  от общей массы материала.

Был применен широкий диапазон частот возбуждения и амплитуды.

Были определены следующие параметры для наклонов (качки):  $0,1 - 3,0 \text{ (Гц)} / 2,09 - 22,2 \text{ (градуса)}$  и для колебаний:  $0,6 - 3,0 \text{ (Гц)} / 0,25 - 17 \text{ (см)}$ .

– Был определен критический уровень влажности (приблизительно  $27 \%$ ), ниже которого материал ведет себя почти как тело; в том смысле, что происходит движение контейнера без смещения материала, независимо от внешней частоты и амплитуды качки.

– После того, как критическое влагосодержание было достигнуто, можем явно определить и охарактеризовать достигнутые результаты: для частоты между  $0,1 - 0,2 \text{ Гц}$  (при наклоне также как и колебании), материал формирует маленькую кучу с его пиком, появляющимся в центре грузовой массы, в то время как небольшое количество воды появляется на кромках емкости (рис. 5 а).

Для частоты в пределах от  $0,4 \text{ Гц}$  и  $0,8 \text{ Гц}$  для наклона и выше  $1,2 \text{ Гц}$  для воздействия колебаний песок смещается к бортам емкости, в то время как

в центре формируется тонкий водяной слой (рис. 5 б).

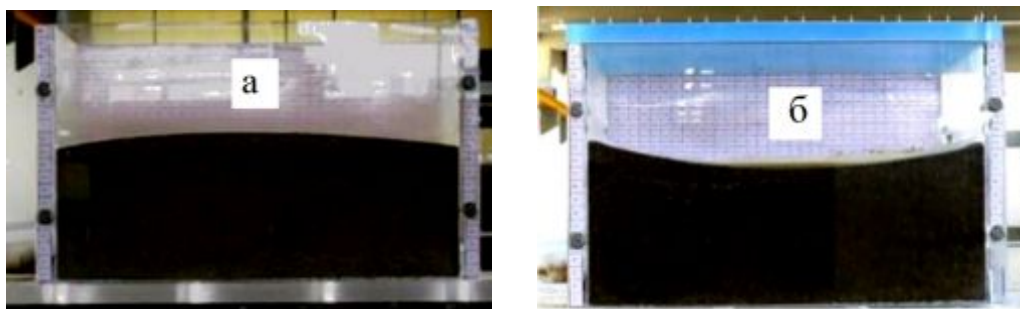


Рис. 5 – Песок с содержанием влаги 27,5 % под воздействием качки и гармонических колебаний: а –  $f = 0,15$  Гц,  $\varphi_{\max} = 4,2$  град.; б –  $f = 0,5$  Гц,  $\varphi_{\max} = 13,2$  град.

- Для жмыха:

Сырье, используемое для экспериментов, поставлялось из двух различных оливковых заводов в Греции (один в Корфу и один в Каламата).

Работа велась с “сухими” и “влажными” образцами жмыха, содержание влаги, находилось на отметке, не превышающей транспортируемый предел, для перевозки морским транспортом.

Проводимая работа была сфокусирована уже не на идентификации критического уровня влажности, а к поведению материала в сценарии транспортировки морским путем.

Поведение песка с содержанием влаги 0 %, идентично поведению жмыха, с тем же содержанием влаги и ведет себя как единое целое.

Для жмыха с определенным содержанием влаги, хотелось бы отметить следующие два момента:

- Распространение влажности из определенных областей концентрации влажности (черные области в материале, рис. 6 а и 6 б) по всему материалу слоев влажности, что приводит к образованию желеобразного состояния и соответственно к смещению материала.

Области концентрации и распространения влаги (темные места рис. 6 а становятся уже однообразными слоями после применения колебаний рис. 6 б). Также видно, что произошло определенное смещение материала к одному из бортов емкости.

- Возбуждение при частотах выше 1,0 Гц приводит к значительному смещению части материала к бортам емкости.

В первом тесте из-за ограничений физического характера максимальный угол наклона достиг 30 градусной отметки. Во втором тесте где материал уже прежде был подвержен колебаниям и сжижение было установлено, материал



начал смещение гораздо ранее (приблизительно на 10 градусной отметке). При этом не какой-то определенный слой стремился к смещению, а весь материал, как единое целое постепенно стремился к бортам емкости.



Рис.6 – Влажный жмых до применения колебаний (а) и после (б) ( $f = 2,2\text{Гц}$ ,  $A = 4,3\text{см}$ ).

Верхнее водяное образование – единственная смещающаяся часть при данных условиях (рис. 7 а).

На более высокой частоте, верхний слой песка под водяным образованием также смещается, хотя и не столь интенсивно (рис. 7 б).

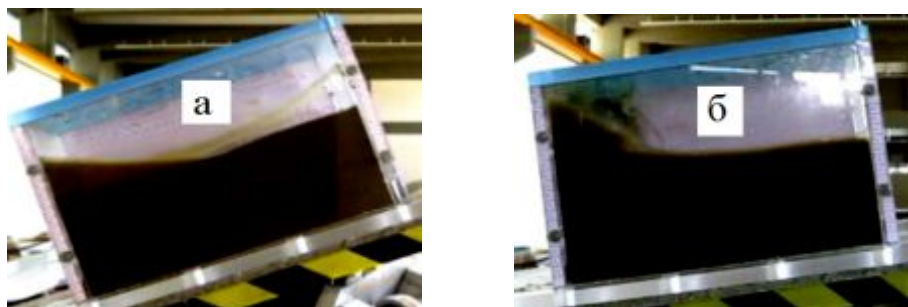


Рис. 7 – Песок с содержанием влаги 40% под воздействием наклона: а –  $f = 0,1\text{Гц}$ ,  $\varphi_{\text{макс}} = 22,2\text{град}$ ; б –  $f = 0,8\text{Гц}$ ,  $\varphi_{\text{макс}} = 9,05\text{град}$ .

Дальнейшее увеличение влажности означает, что количество воды на вершине будет увеличиваться и для низкой внешней частоты верхний водяной слой движется отдельно от основной массы, материал (рис. 7 а).

Частотный диапазон, в пределах которого происходит смещение верхнего слоя песка под водной массой, образовался при относительно низких значениях, например, 0,7 Гц вместо 0,8 Гц для наклона, (рис. 7 б).

При более высоких частотных значениях, водный слой входит в область резонанса и отвечает естественному виду движения (рис. 8 а и 8 б). В том же самое время, слой песка под образованным водным покровом изменяет свое структурное положение.

Было замечено, что продолжительность эксперимента, непосредственно

связана с разжижением исследуемого материала. Увеличение продолжительности ведет к понижению частот, т. е. к условиям способствующим разжижению.



Рис. 8. – Песок с содержанием влаги 40 % под воздействием высоких частот и малой амплитуды: а –  $f = 2,5$  Гц,  $a = 2,37$  см; б –  $f = 1,4$  Гц,  $a = 4,3$  см.

### **Выводы.**

В результате проведенных исследований получены физическая и математическая модель и на их основе общее представление о поведении никелевой руды, при перевозке морским транспортом.

Исследовано воздействие качки и гармонических колебаний при разных частотах. Далее планируется проведение экспериментальной экспертизы для более тяжелых материалов (никель и железная руда). Кроме того, следует исследовать изменение давления на бортовые переборки трюмов, вследствие движения груза.

**Список литературы:** 1. Овчинников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с. 2. Блехман И.И. «Что может вибрация?»: О «вибрационной механике» и вибрационной технике / И.И. Блехман. – М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1998. – 208 с.

**Referens:** 1. Ovchinnikov P.F. Vibroreologija / P.F. Ovchinnikov. – Kiev: Naukova dumka, 1983. – 272 s. 2. Blehman I.I. «Chto mozhет vibracija?»: O «vibracionnoj mehanike» i vibracionnoj tehnikе / I.I. Blehman. – Moscow: Nauka (Gl. red. fiz.-mat. lit.), 1998. – 208 s.

*Поступила в редколлегию (Received by the editorial board) 01.10.14*

УДК 543.1/532.135

**Специфика перевозки никелевой руды навалом / А.В. КРЫЖАНОВСКИЙ // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 53 (1095). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 67 – 75. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0821.**

У цій статті розглядаються проблеми перевезення нікелевої руди навалом і пов'язані з цим небезпеки в наслідку розрідження цього вантажу при перевезенні морським транспортом. Показано що



поведінка нікелевої руди під впливом гармонійних коливань в діапазоні частот і амплітуд чинить негативну дію на остійність судна, що наражає на значну небезпеку як екіпаж судна, так і довкілля.

**Ключові слова:** математична модель, розріджуваність, зміщуємість, щільність, питомий навантажувальний об'єм, питома маса, віброреологія, сегрегація, самосортування, гармонійні коливання.

UDC 543.1/532.135

**The specificity of the carriage of Nickel ore in bulk /A. C. KRYZHANOVSKY / Visnyk NTU «KhPI». – 2014. – № 53 (1095). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 67 – 75. Bibliogr.: 2 names. – ISSN 2079-0821.**

In this article problems of transportation of nickel ore in bulk and the dangers connected with it in a consequence of fluidifying of this freight in transit are considered by sea transport. It is shown that the behavior of nickel ore as a result of harmonic oscillations in the range of frequencies and amplitudes makes negative impact on stability of the vessel, subjecting to considerable danger as vessel crew, and environment.

**Keywords:** mathematical model, liquescence, miscibility, density, specific loading volume, specific weight, vibrorheology, segregation, self-sorting, harmonic oscillations.

УДК 622.7:622.341.1

**В.П. НАДУТЫЙ**, д-р техн. наук, зав. отд., ИГТМ НАНУ, Днепропетровск,

**В.В. ЧЕЛЫШКИНА**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудн., ИГТМ НАНУ,  
Днепропетровск,

**В.В. СУХАРЕВ**, канд. техн. наук, науч. сотрудн., ИГТМ НАНУ,  
Днепропетровск

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА КЛАССИФИКАЦИИ ТОНКИХ МАГНИТОВОСПРИИМЧИВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Изложены результаты исследований процесса гидроклассификации с использованием постоянных магнитных полей для тонких материалов с магнитовосприимчивой компонентой (железomagнетитовые и титаномagnetитовые руды, ильменитовые пески и др. с крупностью частиц менее 150 мкм). Решены следующие задачи: определена плотность магнетитовых флоккул, скорость осаждения сферических и цилиндрических флоккул в магнитном поле, установлена зависимость скорости осаждения от напряженности магнитного поля, получены уравнения равнопадаемости магнитных (флоккул), немагнитных частиц и сростков. Полученные результаты позволяют определять крупность частиц при классификации для разных скоростей восходящего потока и напряженности магнитного поля для существующих гидроклассификаторов и проектировать новые магнитно-гравитационные аппараты.

**Ключевые слова:** гидроклассификация, магнитное поле, флоккулы, скорость осаждения.

© В. П. Надутый, В. В. Чельшкіна, В. В. Сухарев, 2014